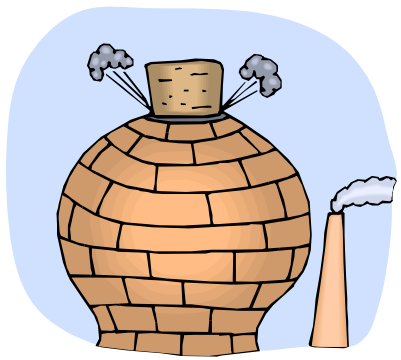
Chapitre B1

Introduction à la vapeur (d’eau)



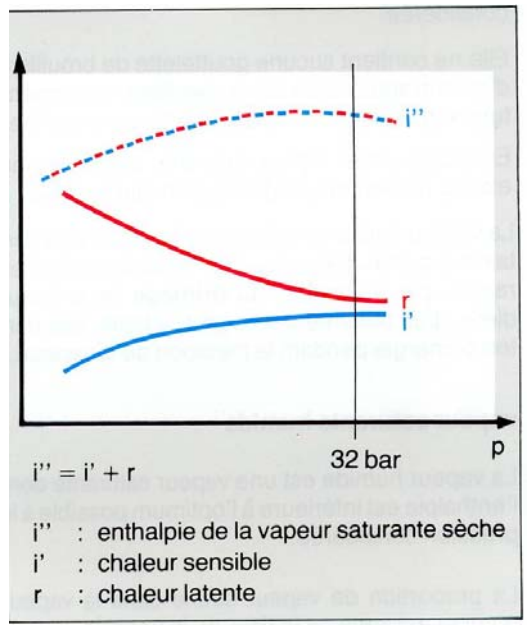
Le choix de la vapeur

Caractéristiques	L'eau	La vapeur	Avantages de la vapeur
Capacité thermique	4.23 kJ/kg K à 110°C	2.08 kJ/kg K à 110 °C	Section des conduites moins élevée, pertes thermiques plus faibles
Coeff. de transfert de chaleur	900 – 1600 W m^{-2} K^{-1}	1600 – 2000 W m^{-2} K^{-1}	Surface d'échange plus faible, économie à l'investissement
Distribution, pertes de charge	Pompe de circulation obligatoire, l'évolution du réseau entraîne une modification de la pompe.	Pertes de charge compensées par ΔP entre chaufferie et fin du réseau.	Le réseau de distribution peut aisément être modifié, évolution de l'outil de production.
Régulation	Par mélange ou échange.	Par vanne, variation de P et T dans l'échangeur.	Variation rapide et précise de la T par P.
Température de paroi	Température variable.	Mode isoperibolique	Indispensable pour procédés à Tp=cst.
Qualité du fluide	Eau non alimentaire.	Fluide propre, sans goût ni odeur.	La vapeur peut être en contact avec des produits alimentaires.
Usages	Limités à échange thermique	Peut être utilisée comme source d'énergie (turbines)	La vapeur dégradée devient de l'eau. Deux modes avec un seul vecteur.

Chaleur

Il existe deux types de chaleur:

- Chaleur sensible: peut être considérée comme l'énergie calorifique qui provoque l'élévation de température d'un corps sans changement d'état. Elle détectable au toucher → d'où le terme de sensible.
- Chaleur latente: énergie emmagasinée pour un changement d'état sans évolution de température. Chaleur latente de fusion ou vaporisation.
- La somme de ces deux chaleur donne l'enthalpie de la vapeur.



Enthalpie de la vapeur à 10 bar absolus	=	Chaleur sensible de l'eau à 180°C	+	Chaleur latente de vaporisation à 10 bar absolus
2776.1 kJ / kg	=	762.6 kJ / kg	+	2013.5 kJ / kg

La vapeur: introduction

Il existe principalement deux types de vapeurs d'eau:

- La vapeur saturée (courbe d'équilibre liq-gaz)
- La vapeur surchauffée (gaz)

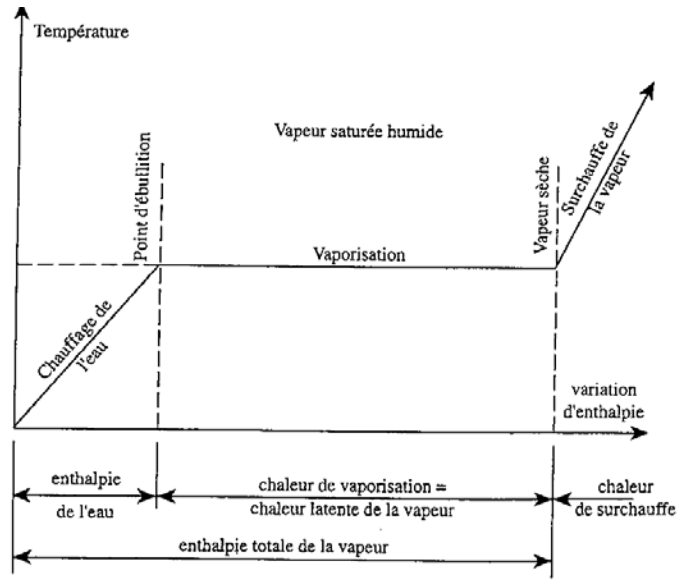
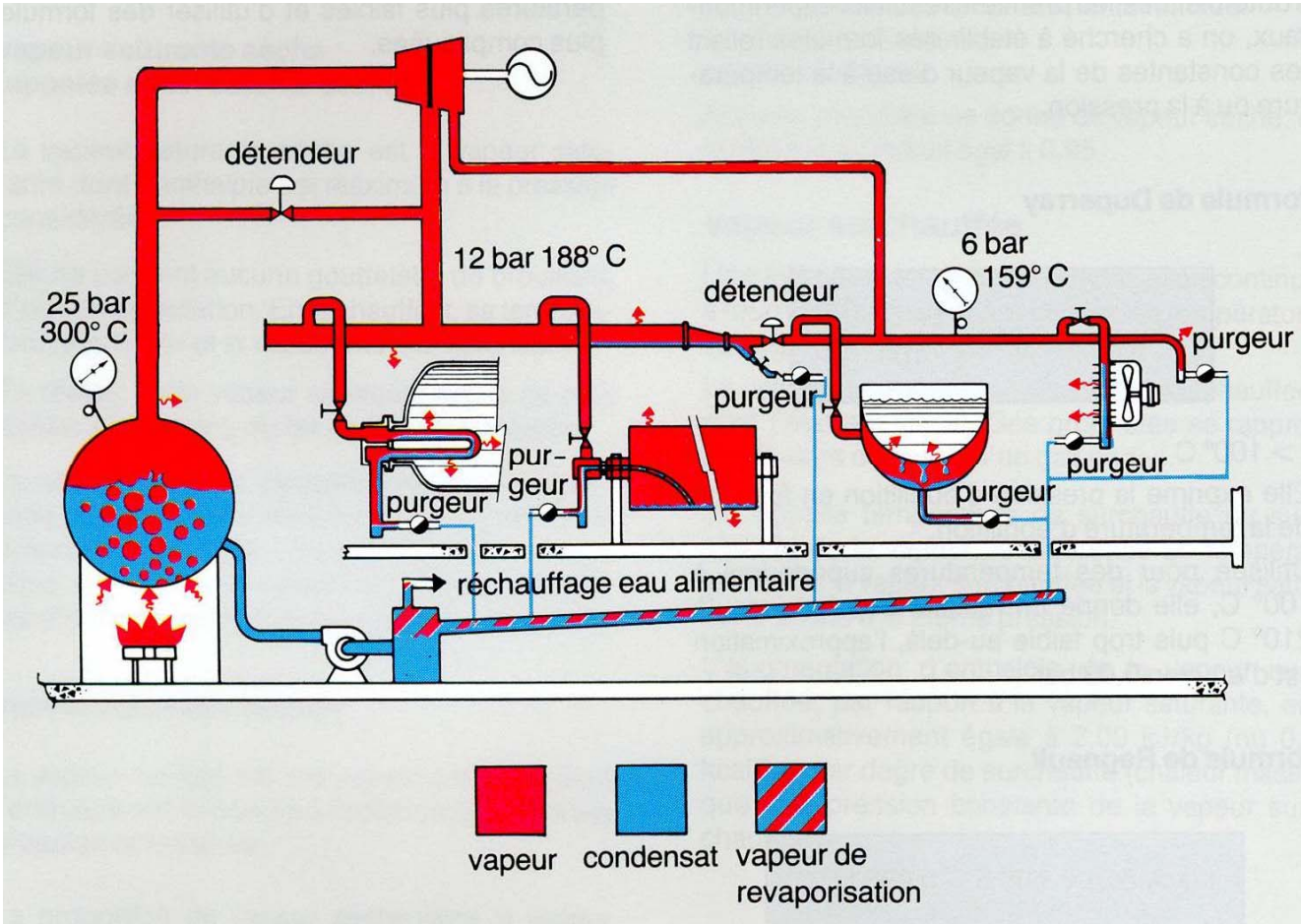


Diagramme d'enthalpie de la fusion, ébullition de l'eau à Patm

1.3.1 - En kJ/kg

Pression (p) (bar)	Temp. vaporis (θ) (°C)	VAPEUR SATUREE					VAPEUR SURCHAUFFEE					
		ENTHALPIE (en kJ/kg)			Volume massique	Masse vol :	ENTHALPIE à p bar et θ °C (en kJ/kg)					
		Eau (sensib.) (hf)	Vaporis. (latente) (hfg)	Vapeur (totale) (hg)	(m^3/kg)	(kg/m^3)	θ = 150 °C	θ = 200 °C	θ = 250 °C	θ = 300 °C	θ = 350 °C	θ = 400 °C
Abs.0,1	**45,81**	**191,83**	**2392,8**	**2584,7**	**14,674**	**0,0681**						
Abs 0,2	**60,06**	**251,4**	**2358,3**	**2609,7**	**7,649**	**0,1307**						
Abs 0,3	**69,1**	**289,23**	**2336,1**	**2625,3**	**5,229**	**0,1912**						
Abs 0,4	**75,87**	**317,58**	**2319,2**	**2636,8**	**3,993**	**0,2504**						
Abs 0,5	**81,33**	**340,49**	**2305,4**	**2645,9**	**3,24**	**0,3086**						
Abs 0,6	**85,94**	**359,86**	**2293,6**	**2653,5**	**2,732**	**0,366**						
Abs 0,7	**89,95**	**376,7**	**2283,3**	**2660**	**2,365**	**0,4228**						
Abs 0,8	**93,5**	**391,66**	**2274,1**	**2665,8**	**2,087**	**0,4791**						
Abs 0,9	**96,71**	**405,15**	**2265,7**	**2670,9**	**1,869**	**0,535**						
Abs 1	**99,63**	**417,46**	**2258**	**2675,5**	**1,694**	**0,5903**	**2779,5**	**2880**	**2976,2**	**3077**	**3183**	**3283**
Rel 0	100	419,04	2257	2676	1,673	0,5977	2779,5	2880	2976,2	3077	3183	3283
Rel 0,2	105,1	440,8	2243,4	2684,2	1,414	0,7072	2778	2879	2976	3077	3182	3283
Rel 0,4	109,55	459,7	2231,3	2691	1,225	0,8163	2776	2879	2976	3077	3181	3283
Rel 0,6	113,56	476,4	2220,4	2696,8	1,083	0,9233	2775	2878	2976	3077	3180	3282
Rel 0,8	117,14	491,6	2210,5	2702,1	0,971	1,0298	2773	2877	2976	3077	3179	3282
Rel 1	120,42	505,6	2201,1	2706,7	0,881	1,135	2771	2876	2976	3077	3178	3282
Rel 1,5	127,62	536,1	2181	2717,1	0,714	1,4005	2767	2872	2974	3076	3176	3280
Rel 2	133,69	562,2	2163,3	2725,5	0,603	1,6583	2763	2867	2972	3075	3176	3278
Rel 2,5	139,02	585	2147,6	2732,6	0,522	1,9157	2759	2865	2970	3074	3175	3278
Rel 3	143,75	605,3	2133,4	2738,7	0,461	2,1691	2755	2864	2969	3074	3174	3277
Rel 3,5	148,02	623,6	2120,3	2743,9	0,413	2,4213	2754	2863	2968	3073	3173	3277
Rel 4	151,96	640,7	2108,1	2748,8	0,374	2,6737		2861	2967	3072	3172	3276
Rel 4,5	155,55	656,3	2096,7	2753	0,342	2,9239		2858	2966	3070	3171	3275
Rel 5	158,92	670,9	2086	2756,9	0,315	3,1746		2855	2962	3068	3169	3274
Rel 5,5	162,08	684,6	2075,7	2760,3	0,292	3,4246		2851	2961	3064	3168	3273
Rel 6	165,04	697,5	2066	2763,5	0,272	3,6764		2848	2960	3063	3167	3273
Rel 6,5	167,83	709,7	2056,8	2766,5	0,255	3,9215		2846	2958	3062	3166	3272
Rel 7	170,5	721,4	2047,7	2769,1	0,24	4,1666		2842	2955	3061	3165	3272
Rel 7,5	173,02	732,5	2039,2	2771,7	0,227	4,4052		2838	2953	3060	3164	3271
Rel 8	175,43	743,1	2030,9	2774	0,215	4,6511		2833	2951	3059	3164	3270
Rel 8,5	177,75	753,3	2022,9	2776,2	0,204	4,9019		2832	2949	3058	3163	3269
Rel 9	179,97	763	2015,1	2778,1	0,194	5,1546		2830	2947	3057	3163	3268
Rel 9,5	182,1	772,5	2007,5	2780	0,185	5,4054		2826	2945	3056	3162	3267
Rel 10	184,13	781,6	2000,1	2781,7	0,177	5,6497		2821	2943	3055	3160	3266
Rel 11	188,02	798,8	1986	2784,8	0,163	6,1349		2817	2939	3054	3158	3265
Rel 12	191,68	815,1	1972,5	2787,6	0,151	6,6225		2813	2934	3052	3156	3262
Rel 13	195,1	830,4	1959,6	2790	0,141	7,0921		2805	2930	3047	3154	3261
Rel 14	198,35	845,1	1947,1	2792,2	0,132	7,5757		2800	2926	3043	3152	3260
Rel 15	201,45	859	1935	2794	0,124	8,0645			2922	3039	3148	3258
Rel 16	204,38	872,3	1923,4	2795,7	0,117	8,547			2918	3037	3146	3257
Rel 17	207,17	885	1912,1	2797,1	0,11	9,0909			2913	3035	3145	3256
Rel 18	209,9	897,2	1901,3	2798,5	0,105	9,5238			2909	3033	3144	3255
Rel 19	212,47	909	1890,5	2799,5	0, 1	10			2905	3031	3143	3253
Rel 20	214,96	920,3	1880,2	2800,5	0,0949	10,5374			2899	3027	3142	3251
Rel 22	219,65	941,9	1860,1	2802	0,0868	11,5207			2893	3022	3140	3248
Rel 24	224,02	952,2	1840,9	2803,1	0,0797	12,547			2884	3014	3131	3244
Rel 26	228,15	981,6	1822,2	2803,8	0,074	13,5135			2872	3006	3127	3240
Rel 28	232,05	999,7	1804,4	2804,1	0,0689	14,5137			2859	3001	3123	3236
Rel 30	235,78	1017,1	1787	2804,1	0,0645	15,5038			2845	2993	3117	3232
Rel 34	242,63	1049,7	1753,8	2803,5	0,0571	17,5131			2830	2985	3110	3227
Rel 38	248,95	1080,3	1721,6	2801,9	0,051	19,6078			2802	2968	3098	3219
Rel 42	254,74	1108,6	1691,2	2799,8	0,0461	21,6919				2963	3091	3210
Rel 46	260,13	1135,3	1661,6	2796,9	0,0421	23,7529				2945	3080	3202
Rel 50	265,26	1160,8	1632,8	2793,6	0,0386	25,9067				2928	3068	3193
Rel 99	310,96	1408	1320	2728	0,01804	55,43					2927	3099

La production de vapeur (1)



La vapeur produite peut être utilisée sous deux aspects: énergie potentielle et énergie calorifique

La production de vapeur (2)

Chaudière thermique

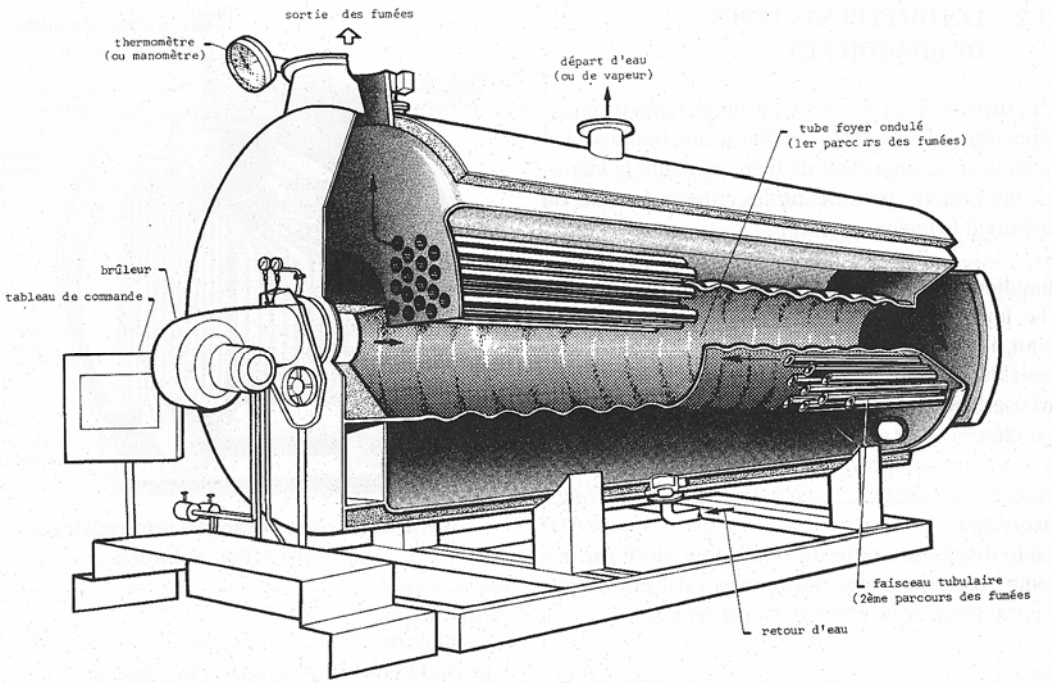
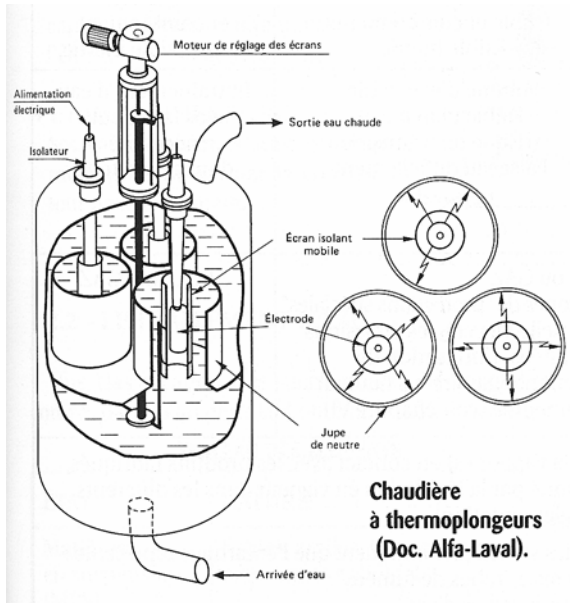


Fig. 1. — Chaudière de type industriel à tubes de fumée et à foyer concentrique (*Doc. SEUM*)

- Rendement élevé
- Températures des fumées basses
- Grand volume d'eau, grande inertie au démarrage
- Limite: 20 t/h et 25 bars.

Chaudière électrique



- Rendement très élevé
- Uniquement de la vapeur saturée.

Figures: La vapeur, mode d'emploi, PYC

Energies

Energie potentielle ou de pression:

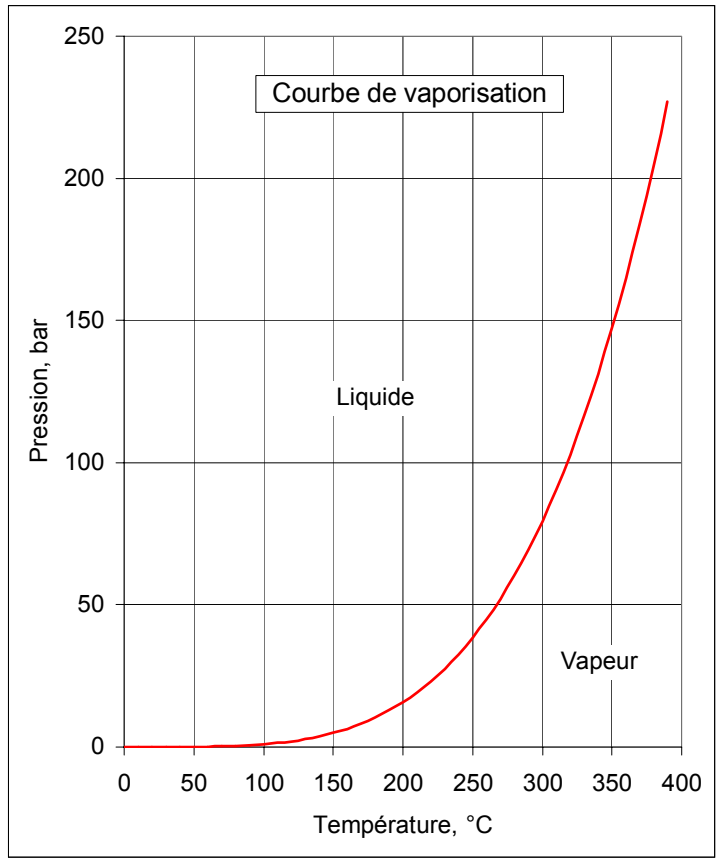
- Sans travail extérieur: si aucun échange calorifique entre la vapeur et le milieu environnant n'est possible, l'énergie de vapeur ne peut se dégrader par chute de pression car l'enthalpie reste constante. Au passage d'une vanne de détente, la vapeur saturée devient surchauffée mais à une pression inférieure.
- Avec travail extérieur: en cas de travail fourni par la vapeur, il y chute de pression et échange calorifique, l'enthalpie diminue. La vapeur est alors détendue dans une turbine. A cette chute de pression correspond une chute d'enthalpie.

Energie calorifique:

- La vapeur peut transférer de la chaleur au milieu environnant par condensation. Elle cède l'énergie (chaleur latente) emmagasinée lors de la vaporisation

La vapeur saturée (1)

- Relation étroite entre T et P
- La vapeur est automotrice (utilisation de la pression)
- On appelle *condensats* l'eau résultant de la condensation de la vapeur.
- La chaleur latente de vaporisation est transférée lors du changement d'état à T et P constants.



La vapeur d'eau saturée (2)

Il existe des formules empiriques pour la vapeur saturée:

Pression d'ébullition:

$$P(bar) = 0.981\left[\frac{T}{100}\right]^4$$

Dupperay , T > 100 en °C

Chaleur latente de vaporisation:

$$\Delta H_v(J/g) = 4.18\left(606.5 - 0.695 \cdot T\right)$$

Regnault , T en °C

Relation en pression d'ébullition et volume massique:

$$\underset{(bar)}{P} \cdot \underset{(m^3 kg^{-1})}{V_m} = 2$$

Bertin

La vapeur saturée : le titre

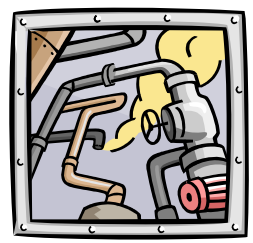
Le titre de la vapeur : définit la fraction massique de vapeur sèche

$$titre\ \chi = \frac{m_{vapeur}}{m_{vapeur} + m_{eau}}$$

La vapeur sèche ne contient aucune particule d'eau sous forme liquide, c'est un gaz.

Une vapeur de titre 0.95 contient par kg, d'une part, 950 g de vapeur sèche et 50 g d'eau non vaporisée.

Ce mélange vapeur/eau ne contient donc que 95% de l'enthalpie de vaporisation.



Titre de la vapeur : exercice (1)

On désire détendre de la vapeur ayant un titre de 1, de 21 à 6 bars.
Quelle sera la température de la vapeur détendue ? $c_{p,\ vap.\ surch}$= 2.0 kJ/kg K

$H_{vap,tot}$ à 6 bars = 2756.9 kJ/kg
$H_{vap,tot}$ à 21 bars = 2800.5 kJ/kg

$$m \cdot c_p \cdot \Delta T = m \cdot \Delta H_{vap,tot} \rightarrow \Delta T = \frac{\Delta H_{vap,tot}}{c_p} = \frac{2800.5 - 2756.9}{2.0} = 21.8°C$$

La température de la vapeur détendue sera donc de T= 159 + 21.8 = 180.8 °C

Titre de la vapeur : exercice (2)

On désire détendre de la vapeur ayant un titre de 0.96 de 21 à 6 bars.

Quelle sera la température de la vapeur détendue ? $c_{p,\ vap.\ surch}$= 2.1 kJ/kg °C

$H_{vap,tot}$ à 6 bars = 2756.9 kJ/kg
$H_{vap,tot}$ à 21 bars = 2800.5 kJ/kg mais avec un titre de 0.96 il manque 4% de chaleur latente, soit 1880.2·0.04 = 75.2 kJ/kg.

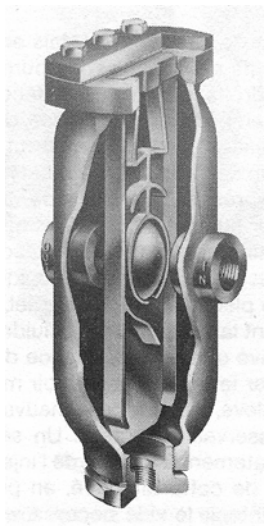
Donc $H_{vap,tot}$ à 21 bars et un titre de 0.96 = 2800.5 -75.2 = 2725.3 kJ/kg

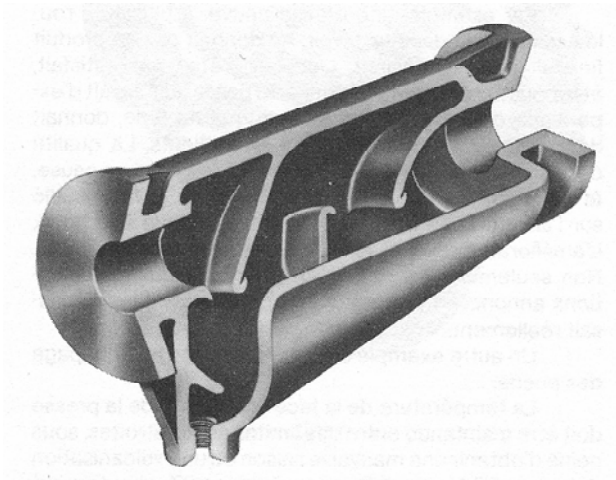
Cette valeur étant inférieure de celle à 6 bars, le rapport des 2 chaleurs totales devient 2725.3/2756.9 = 0.988.

Cette détente n'a pas surchauffé la vapeur, mais à relevé son titre, puisqu'à 6 bars, il est de 0.988 au lieu de 0.96.

La vapeur saturée sèche

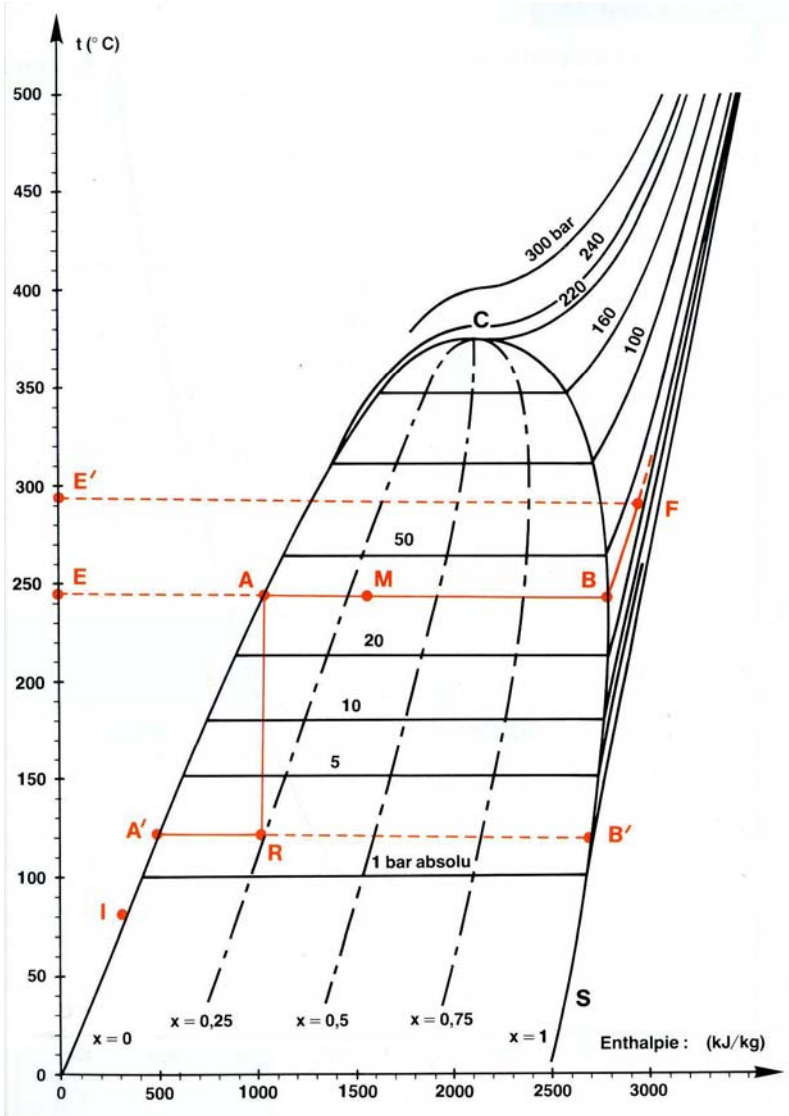
- La vapeur, lors de son transport devient « humide » a cause des pertes thermiques.
- La vapeur sèche à un titre de 1.
- Pour garantir de la vapeur sèche on utilise des sécheurs ou séparateurs d'eau.
- Installation en série, où la vapeur subit une forte chute de vitesse et de direction de façon à séparer les particules d'eau et les amener au point de purge.





Figures: Spirax Sarco, cahier technique, IB5

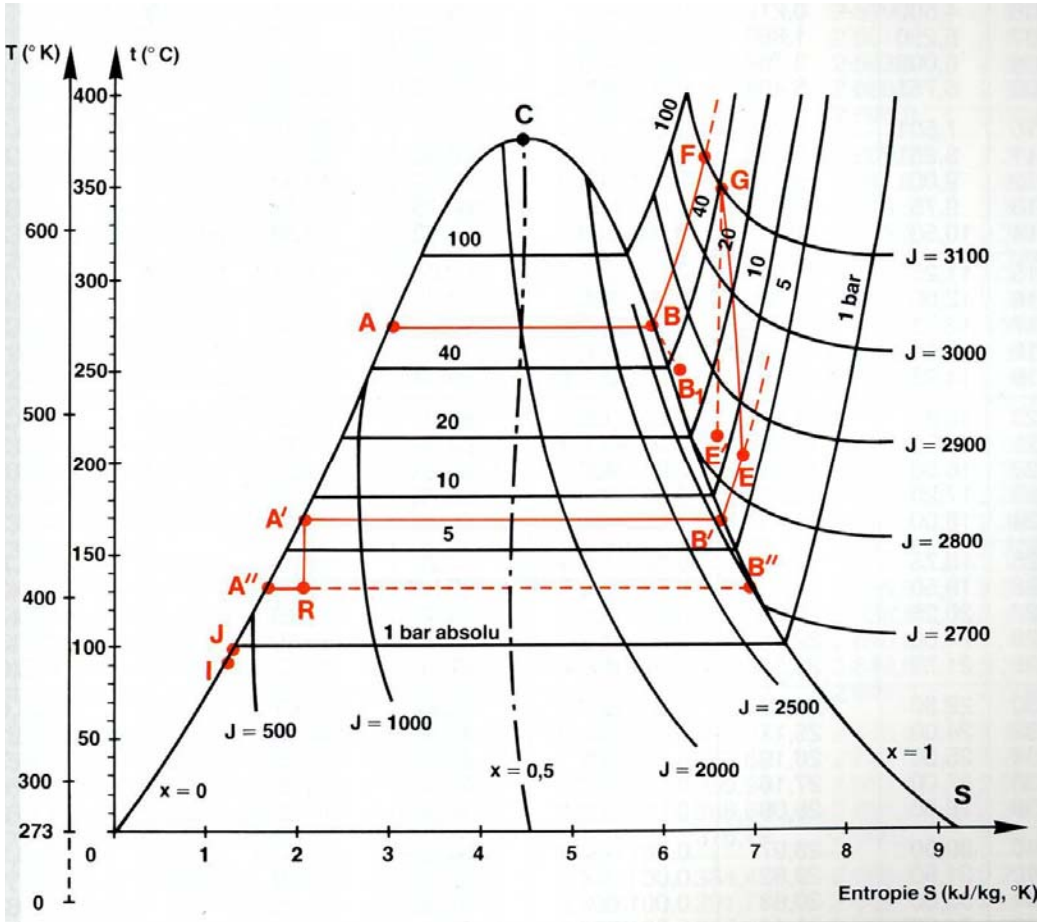
Diagramme d'enthalpie de la vapeur d'eau



- EA: enthalpie du liquide à T saturation
- EB: enthalpie de la vapeur sèche (x=1) à T saturation
- EM: enthalpie d'un mélange biphasique T saturation
- E'F: enthalpie de la vapeur surchauffée
- AB: chaleur latente de vaporisation
- x: titre de la vapeur en un point M, rapport AM/AB

Exemple: En partant d'un état initial I, on chauffe l'eau jusqu'à une température correspondante à A. On vaporise entre A et B, et on surchauffe jusqu'en F.
Inversement en utilisant la vapeur elle cèdera la chaleur de F à A. Le purgeur recevra les condensats en amont A et d'une manière isenthalpique les enverra dans la canalisation au point R (nouvel équilibre). Il y a revaporisation partielle et le nouveau titre est RA'/A'B'.

Diagramme d'entropie de la vapeur d'eau



- OC: courbe de saturation
- CS: courbe de vapeur saturée sèche
- AB: palier isobare
- BF: courbe isobare en vapeur surchauffée
- J: courbe isenthalpique
- IJ: compression adiabatique de l'eau avant chauffage
- JA: chauffage de l'eau → T saturation
- AB: vaporisation de l'eau
- BF: surchauffe de la vapeur
- FG: détente isenthalpique (par vanne de réglage).
- GE: détente réelle de la vapeur dans une turbine (GE' sans pertes = isentropique)

Figures: Purge de condensats, Tec&Doc

Les purgeurs

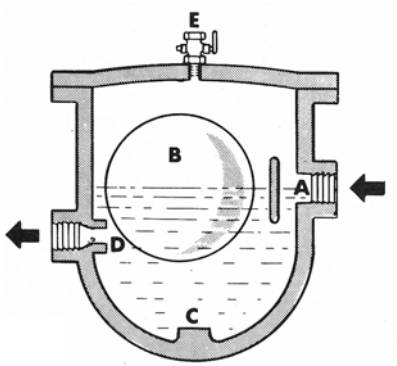
Fonction : Laisser passer le condensat et retenir la vapeur

Il existe 4 types de purgeurs :

- Mécaniques (différence de densité)
- Thermostatiques (différence de température)
- Thermodynamiques (différence de vitesse)
- Autres (utilisation des pertes de charges)

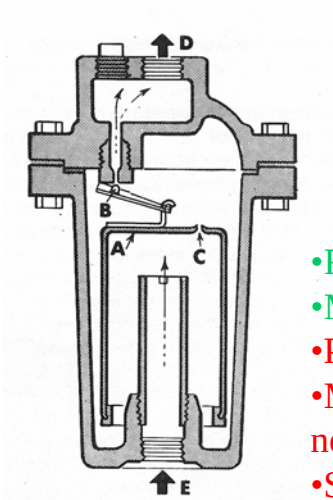
Les purgeurs mécaniques

A flotteur libre



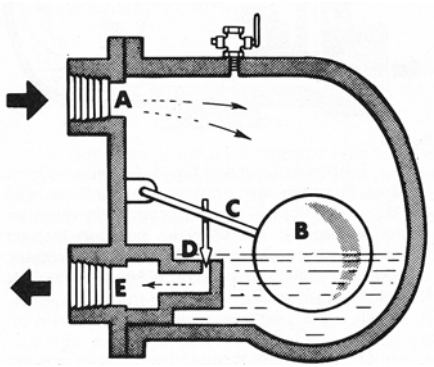
- Entretien minimum.
- Pannes minimum.
- Selon construction, orifice D bouché par B avant que le condensat ne s'écoule.
- Etanchéité difficile entre B et D.

A flotteur inversé ouvert

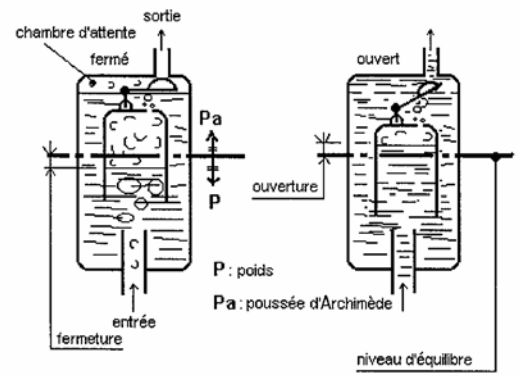


- Résiste aux coups de bélier.
- Mécanique robuste.
- Purge d'air problématique.
- Minimum d'eau au fond est nécessaire.
- Sensible au gel.

A flotteur fermé



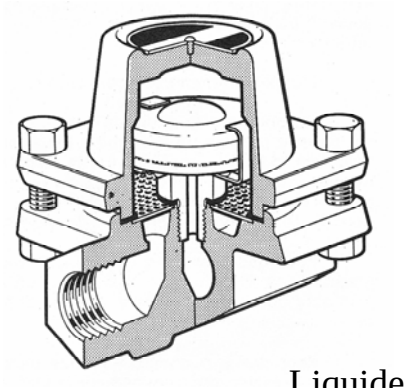
- Adaptation aux fluctuations de T et P.
- Utilisé lors de régulation de T.
- Sensible au gel.
- Pas d'utilisation avec vapeur surchauffée.
- Sensible aux coups de bélier.



Figures: Spirax Sarco, cours vapeur

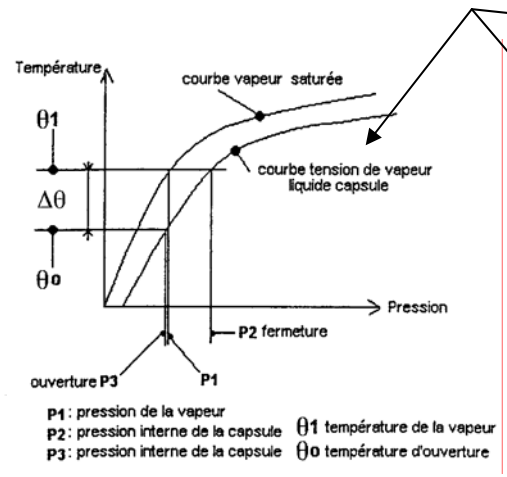
Les purgeurs thermostatiques

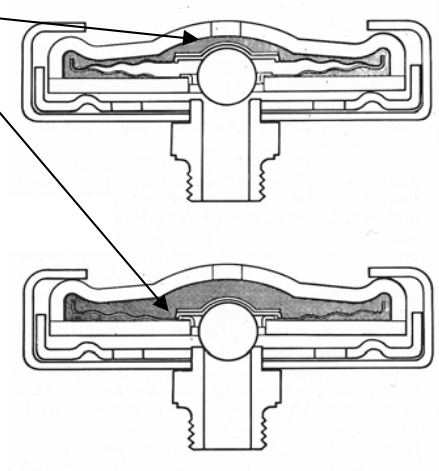
A pression équilibrée (capsule ou soufflet)



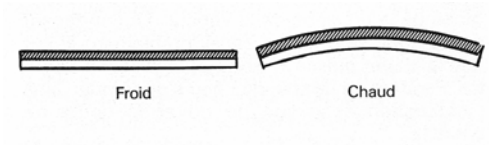
- Résiste aux coups de bélier.
- Encombrement faible.
- Débits de condensats limités.
- Sensible au gel.

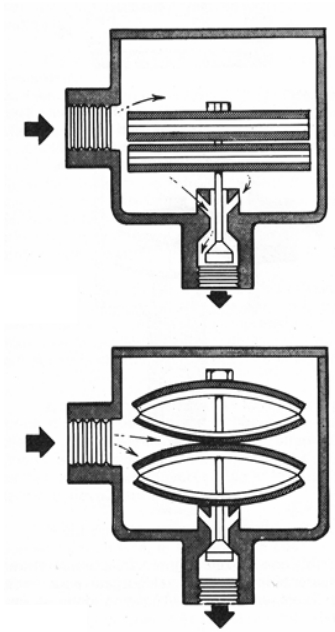
Liquide (alcools)





Bimétalliques





- Résiste au coups de bélier
- Supporte de grand écarts de P et T.
- Inertie aux changements de P et T.
- Electrolyse possible (deux métaux).

Les purgeurs thermodynamiques

purgeur thermodynamique

purgeur thermodynamique à disque

Construction :

1 disque (faisant office d'obturateur)
2 sièges
3 chambre de pression
4 orifice d'évacuation

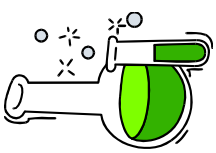
Fonctionnement :

La prédominance alternée des pressions sur chacune des faces du disque provoquent les mouvements d'ouverture et de fermeture du disque.

DÉMARRAGE

- le purgeur est vide de condensats ; le disque repose sur les sièges.
- l'arrivée d'air et d'incondensables soulève le disque puis le bloque en position fermée (l'air agit de la même façon que la vapeur en régime établi).
- à l'arrivée des condensats, le disque ne s'ouvre que lorsque l'air est évacué (sinon l'air le bloque).

Figures: Purge de condensats, Tec&Doc



Les purgeurs à impulsion

purgeur à impulsion

Construction :

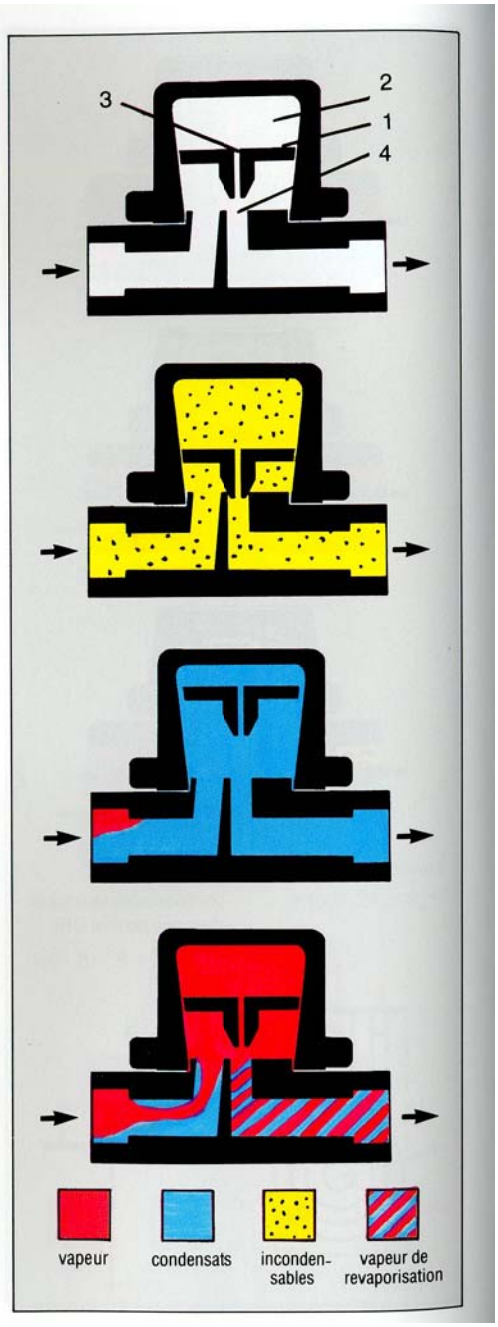
1 Obturateur
2 chambre de pression
3 orifice de décompression
4 orifice d'évacuation

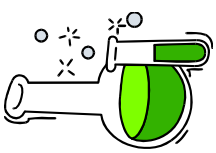
Fonctionnement :

Les variations de pression dans la chambre de pression provoquent les mouvements d'ouverture et de fermeture de l'obturateur.

DÉMARRAGE

- le purgeur est vide de condensats ; l'obturateur repose sur le siège.
- L'arrivée d'air et des incondensables dans le purgeur soulève l'obturateur puis le ferme instantanément (l'air agit de la même façon que la vapeur en régime établi). L'air s'évacue ensuite par l'orifice de décompression.
- l'arrivée des condensats froids dans le purgeur entraîne l'ouverture de l'obturateur lorsque l'air est entièrement évacué.



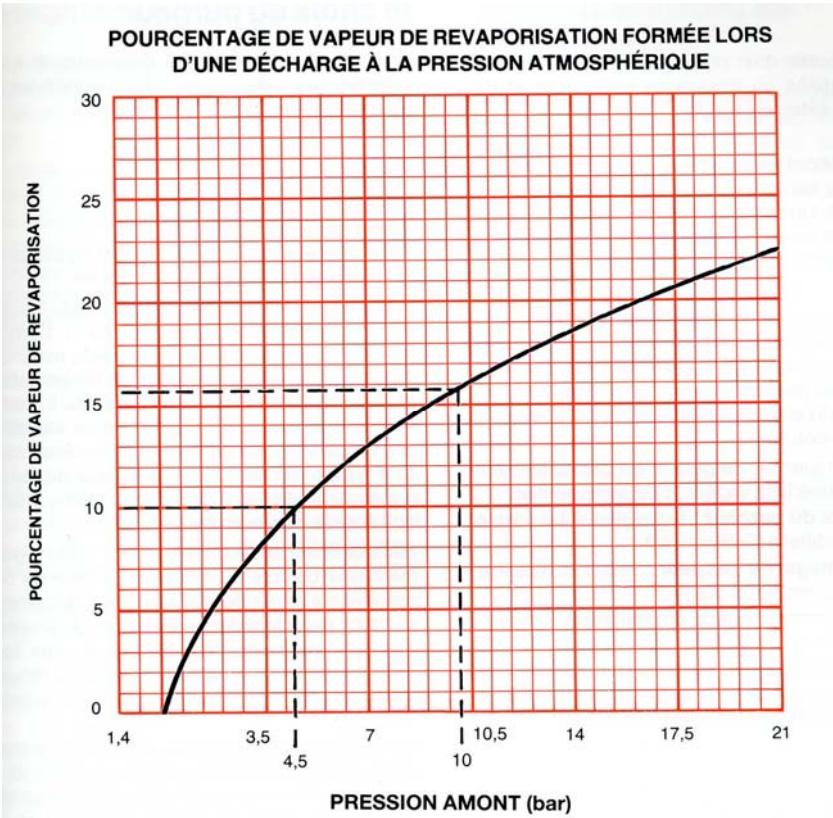


La revaporisation

Lorsque les condensats traversent le clapet d'un purgeur, leur pression chute très rapidement accompagnée d'une chute de température. Cette chute s'accompagne d'un apport calorifique équivalent aux condensats détendus. En aval du purgeur les condensats se revaporisent en consommant les calories disponibles.

La fraction massique de condensats revaporisés peut s'estimer à l'aide du bilan suivant (am:amont du purgeur, av:aval du purgeur):

$$w_{rev} = \frac{\Delta \text{ chaleur sensible des condensats (amont-aval)}}{\Delta H_{v,av}}$$



La vapeur surchauffée

En chauffant d'avantage la vapeur sèche, elle devient surchauffée :

- La courbe de saturation n'est plus suivie
- Il n'y a plus d'eau sous forme liquide
- T n'est pas fonction de P
- Son utilisation principale est le turbinage (parfois jusqu'à 700 °C), évite la présence de gouttelettes.
- Pour les grandes distances à parcourir, on évite la condensation qui survient avec la vapeur saturée.
- Le transfert thermique est inférieur à celui de la vapeur sèche ou saturée.
- Seul le c_p est utilisé jusqu'à la courbe d'équilibre, ensuite le ΔHv

Table c_p de l'eau

$$Capacité\ thermique\ c_p = \frac{chaleur\ transférée}{différence\ de\ T}\ de\ l'objet = \frac{\Delta Q}{\Delta T}\ en\ kJ\ kg^{-1}K^{-1}$$

Capacité thermique c_p (kJ/kg K) à pression constante de l'eau en fonction de T et P

Druck	Temperatur in °C														
bar	0	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
1	4,217	4,182	4,181	2,032	1,979	1,974	1,988	2,011	2,037	2,068	2,099	2,132	2,200	2,270	2,341
5	4,215	4,181	4,180	4,215	4,310	2,143	2,079	2,065	2,073	2,093	2,118	2,146	2,208	2,276	2,346
10	4,212	4,179	4,179	4,214	4,308	2,431	2,215	2,141	2,121	2,126	2,141	2,164	2,219	2,283	2,352
50	4,191	4,166	4,170	4,205	4,296	4,477	4,855	3,299	2,669	2,451	2,360	2,324	2,311	2,347	2,402
100	4,165	4,151	4,158	4,194	4,281	4,450	4,791	5,703	4,042	3,078	2,726	2,569	2,445	2,429	2,465
150	4,141	4,137	4,148	4,183	4,266	4,425	4,735	5,495	8,863	4,155	3,235	2,875	2,597	2,517	2,531
200	4,117	4,123	4,137	4,173	4,252	4,402	4,685	5,332	8,103	6,327	3,959	3,257	2,767	2,610	2,598
250	4,095	4,109	4,127	4,163	4,239	4,379	4,639	5,201	7,017	13,02	5,020	3,731	2,956	2,709	2,666
300	4,073	4,097	4,117	4,153	4,226	4,358	4,598	5,091	6,451	25,71	6,624	4,317	3,161	2,814	2,736
350	4,052	4,084	4,107	4,144	4,214	4,338	4,560	4,999	6,084	11,79	8,875	5,019	3,381	2,925	2,807
400	4,032	4,073	4,098	4,135	4,202	4,319	4,525	4,919	5,820	8,784	10,89	5,807	3,612	3,040	2,878
450	4,013	4,062	4,089	4,126	4,190	4,301	4,493	4,848	5,616	7,517	10,83	6,584	3,849	3,158	2,951
500	3,994	4,051	4,081	4,117	4,179	4,284	4,463	4,786	5,451	6,814	9,483	7,200	4,086	3,278	3,024
600	3,957	4,032	4,064	4,100	4,157	4,252	4,410	4,681	5,200	6,047	7,466	7,480	4,521	3,515	3,168
700	3,920	4,014	4,049	4,084	4,137	4,222	4,362	4,595	5,014	5,621	6,440	6,913	4,857	3,736	3,309
800	3,883	3,997	4,035	4,068	4,117	4,195	4,320	4,523	4,871	5,340	5,844	6,310	5,053	3,928	3,441
900	3,844	3,982	4,022	4,054	4,099	4,169	4,282	4,462	4,757	5,135	5,465	5,854	5,104	4,082	3,562
1000	3,800	3,968	4,010	4,039	4,081	4,145	4,248	4,410	4,663	4,975	5,203	5,511	5,057	4,196	3,670

Source: VDI-Wärmeatlas